

УДК 621.923

В. А. Федорович, д-р техн. наук, И. Н. Пыжов, д-р техн. наук, Харьков,  
Украина

### **3D МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

*Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями формирования напряженно-деформированного состояния системы «связка – алмазное зерно – металлофаза – обрабатываемый материал». Показана существенная роль концентрации зерен в алмазоносном слое круга и высоты их выступания над уровнем связки. Установлена зависимость напряжений в системе от указанных факторов и даны практические рекомендации.*

*Ключевые слова: алмазоносный слой круга, металлофаза, связка круга, алмазное зерно, концентрация, высота зерен над связкой круга, 3D моделирование, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные напряжения*

*Розглянуто питання, пов'язані з особливостями формування напружено-деформованого стану системи «зв'язка – алмазне зерно - металофаза - оброблювальний матеріал». Показана суттєва роль концентрації зерен в алмазоносному шарі круга і висоти зерен над зв'язкою круга. Встановлено залежність напружень в системі від зазначених факторів і дані практичні рекомендації.*

*Ключові слова: алмазоносний шар круга, металофаза, зв'язка круга, алмазне зерно, концентрація, висота зерен над зв'язкою круга, 3D моделювання, напружено-деформований стан, еквівалентні напруження*

*Questions related to the features of the formation of the stress-strain state of the "bundle-grain-metal phase-processed material" system are considered. The essential role of the concentration of grains in the diamond-bearing layer of the circle and the height of their protrusion above the ligament level is shown. The dependence of stresses in the system on these factors is established and practical recommendations are given.*

*Keywords: Diamond-bearing layer of a circle, a metal phase, a bunch of a circle, a diamond grain, concentration, the height of grains over a bundle of a circle, 3D modeling, stress-strain state, equivalent stresses*

**1. Постановка проблемы.** Алмазное шлифование продолжает оставаться эффективным методом обработки изделий из труднообрабатываемых материалов. В связи с этим можно ожидать, что путем рационального выбора параметров алмазоносного слоя круга в сочетании с обеспечением развитости режущего рельефа рабочей поверхности круга (РПК) удастся полнее использовать потенциально высокий режущий ресурс дорогостоящих алмазных зерен. Это позволит увеличить работоспособность алмазоносного слоя в целом, что положительно скажется на характеристиках качества обрабатываемых изделий [1].

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** Результаты уже выполненных теоретических и экспериментальных исследований в направлении

повышения эффективности алмазно-абразивной обработки свидетельствуют об эффективности подхода основанного на использовании моделирования [2-3]. Однако анализ литературных источников показал, что на настоящий момент существует ряд вопросов, которые еще не исследовались с использованием 3D моделирования. На наш взгляд это не позволяет дать правильную физическую трактовку явлениям, происходящим в зоне контакта РПК с обрабатываемым материалом (ОМ), а, следовательно, затрудняет определение рациональных условий самозатачивания алмазных кругов при шлифовании. Кроме того без использования модельных экспериментов невозможно до минимума сократить число длительных, трудоемких, а, следовательно, и дорогостоящих станочных экспериментальных исследований.

Известно [2-3], что использование компьютерных информационных технологий на всех этапах жизненного цикла изделий рассматривается как приближение к идеологии CALS-технологии (Computer-125 Aided Logistics Support). Они обеспечивают компьютерное управление жизненным циклом изделия на всех этапах: разработки концепции изделия; проведения научно-исследовательских работ; проектирования, производства; эксплуатации изделия; модернизации изделия; обеспечения ремонта и технического обслуживания изделия; утилизации.

В настоящей статье для реализации поставленных задач изучения напряженно – деформированного состояния (НДС) в зоне обработки были использованы расчетные комплексы ANSYS, LS-DYNA, Third Wave AdvantEdge, CosmosWorks, Abaqus предназначенные для исследовательских расчетов методом конечных элементов. Для построения 3D-моделей, имитирующих упомянутые процессы, применялась САПР в трёх измерениях (SolidWorks).

**3. Цель исследования.** Целью исследования является совершенствование высокоскоростного процесса алмазного шлифования путем 3D моделирование напряженно-деформированного состояния зоны обработки.

**4. Основные материалы исследования.** Для изучения возможности разрушения алмазного зерна в процессе шлифования, прежде всего, необходимо учитывать влияние температуры, возникающей в зоне шлифования при абразивной обработке материалов, на НДС системы «связка – зерно – металлофаза – ОМ». С этой целью был использован программный пакет CosmosWorks, позволяющий проводить трехмерное статическое моделирование. Прежде всего, была построена исходная 3D модель «связка – зерно – металлофаза – ОМ» на рисунке 1,а. Полагалось, что модели являются сплошными упругими телами. Фрагменты связки и ОМ представлены в виде призматических пластин с размерами соответственно 0,5×0,5×0,5 мм и 0,5×0,5×0,3 мм. Зерна алмаза моделировались в форме октаэдра размером

100×70 мкм. Металлофаза моделировалась в виде небольшой пластины размером 4х4х1 мкм.

Следующим этапом моделирования являлось генерирование сетки конечных элементов (рис. 1,б) и ее сгущение в области контакта алмазного зерна с ОМ, а также в области включения металлофазы. Затем были определены физико-механические свойства всех элементов системы. Всем элементам системы были заданы материалы: связка – на основе меди, ОМ – твердый сплав (ТС), металлофаза – никель. В качестве материала зерна выбран алмаз марки AC100 ( $Z=125/100$ ).

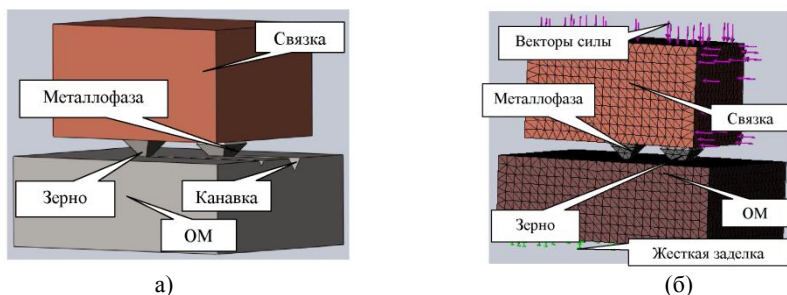


Рисунок 1 – 3D модель исследуемой системы (а) и сетка конечных элементов и нагружение модели исследования (б)

При расчетах использовались следующие физико – механические свойства зерен алмаза: предел прочности на растяжение ( $\sigma_{\text{раст}} = 2,18 \text{ ГПа}$ ); предел прочности на сжатие ( $\sigma_{\text{сж}} = 12,9 \text{ ГПа}$ ), модуль упругости ( $E = 9 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ ), коэффициент термического расширения ( $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ ) [4].

Следующим этапом моделирования было задание параметров нагружения модели. В ходе расчетного эксперимента модель нагружалась нормальными силами  $P_y$ , равными 3Н, и тангенциальными силами  $P_z$ , равными 2Н. Это позволяло моделировать движение алмазного шлифовального круга во время абразивной обработки.

Таким образом, модельные эксперименты по определению 3D НДС зоны шлифования позволяли учесть суммарное воздействие термосиловых факторов на состояние системы «ОМ – зерно – металлофаза – связка».

*Исследование влияния концентрации алмазных зерен на 3D НДС зоны шлифования.* Анализ существующих рекомендаций и справочных данных показал, что, относительная концентрация зерен в алмазных кругах обычно составляет 100 %. Как показали наши исследования, при обработке, например, СТП концентрация алмазных зерен в алмазоносном слое является одним из важнейших факторов, определяющих конечные значения выходных показателей обработки [5-8].

Для установления физических особенностей процесса шлифования, прежде всего, необходимо определить влияние концентрации алмазных зерен в шлифовальном круге при абразивной обработке материалов на НДС системы «связка – алмазное зерно – металлофаза – ОМ». Исходная 3D модель системы представлена на рисунке 2.

В пластине обрабатываемого материала создана канавка-след от алмазного зерна. Концентрация задавалась путем изменения расстояния между зернами.

На втором этапе производилось создание сетки конечных элементов и ее сгущение в области абразивного зерна с ОМ и задание параметров нагружения модели (рис. 3).

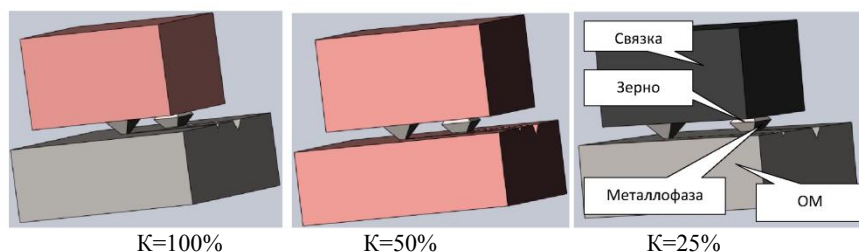


Рисунок 2 – 3D модель исследуемой системы

Учитывая важность и других параметров процесса шлифования, был реализован многофакторный план типа В4 [9] согласно данным, приведенным в таблице 1.

Уравнение регрессии в кодированной форме имеет вид:

$$Y = 4,063 - 0,458X_1 + 0,333X_2 + 0,713X_3 - 0,585X_4 - 0,561X_1^2 - 0,396X_1^3 - 0,346X_1^4 + 0,083X_2^3 + 0,013X_2^4 + 0,073X_3^4 - 0,012X_1^2 + 0,123X_2^2 + 0,848X_3^2 - 0,912X_4^2$$

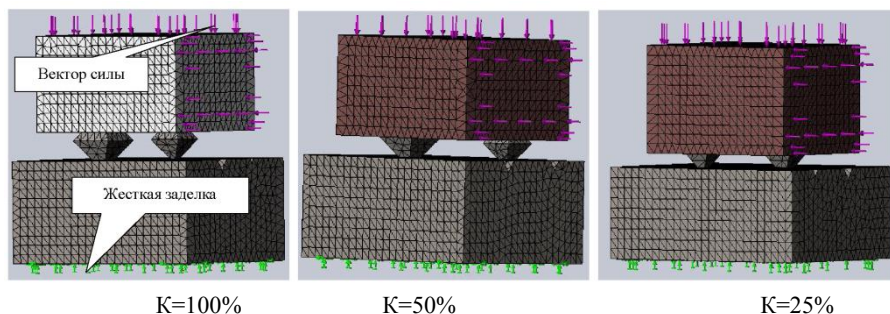


Рисунок 3 – Сетка конечных элементов и нагружение модели исследования

Таблица 1 – Уровни факторов плана В4

Уровни факторов	Факторы							
	КТР металлофазы		Концентрация алмазных зерен		Скорость резания		Модуль упругости ОМ	
	Натуральное значение, 1/К	Кодированное значение $X_1$	Натуральное значение, %	Кодированное значение $X_2$	Натуральное значение, м/с	Кодированное значение $X_3$	Натуральное значение, Н/м <sup>2</sup>	Кодированное значение $X_4$
Верхний	$2,4 \cdot 10^{-5}$	+1	75	+1	200	+1	$1,4 \cdot 10^{11}$	+1
Основной	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0	50	0	160	0	$1,25 \cdot 10^{11}$	0
Нижний	$1,2 \cdot 10^{-5}$	-1	25	-1	120	-1	$1,1 \cdot 10^{11}$	-1

На рисунке 4 представлена визуализация некоторых результатов моделирования по влиянию концентрации алмазных зерен на 3D НДС зоны шлифования при постоянных остальных условиях обработки ( $\alpha=2,4 \cdot 10^{-5}$ ,  $V_k=200$  м/с  $E=1,4 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>).

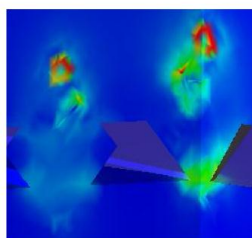
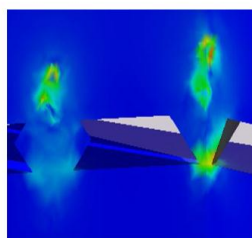
K=100% ( $\sigma_{\text{экв.}}=1,72$  ГПа)K=25% ( $\sigma_{\text{экв.}}=1,85$  ГПа)

Рисунок 4 – Результаты расчета НДС

*Исследование влияния глубины заделки алмазных зерен на 3D НДС зоны шлифования.* Была поставлена задача установления особенностей изменения эквивалентных напряжений в местах контакта алмазных зерен со связкой и ОМ в предположении, что это даст возможность установить возможность реализации процесса микро – и макроразрушения алмазных зерен, а, следовательно, ответить на вопрос как обновляется режущая поверхность алмазного круга в целом.

Для изучения влияние глубины заделки алмазных зерен была предложена исходная 3D модель для исследования НДС системы «связка – алмазное зерно – металлофаза – ОМ» (рис. 5).

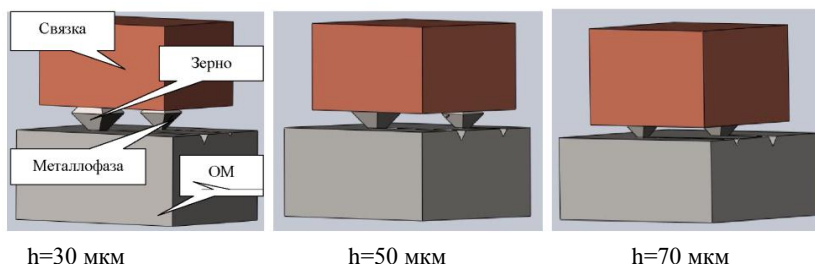


Рисунок 5 – 3D модель исследуемой системы

Фрагменты связки и обрабатываемого материала представлены в виде призматических пластин с размерами соответственно  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  мм и  $0,5 \times 0,5 \times 0,3$  мм. В пластине обрабатываемого материала создана канавка. Зерна алмаза моделировались в форме октаэдра размером  $100 \times 60$  мкм и  $80 \times 50$  мкм. Металлофаза моделировалась в виде небольшой пластины размером  $4 \times 4 \times 1$  мм.

На втором этапе производилось создание сетки конечных элементов и ее сгущение в области абразивного зерна с обрабатываемым материалом (рис. 6).

Следующим этапом моделирования было задание параметров нагружения модели (рис. 6).

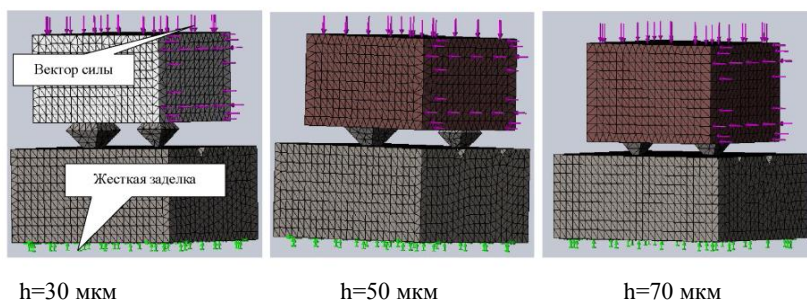


Рисунок 6 – Сетка конечных элементов и нагружение модели исследования

Учитывая важность и других параметров процесса шлифования, был реализован многофакторный план типа В4 согласно данным, приведенным в таблице 2.

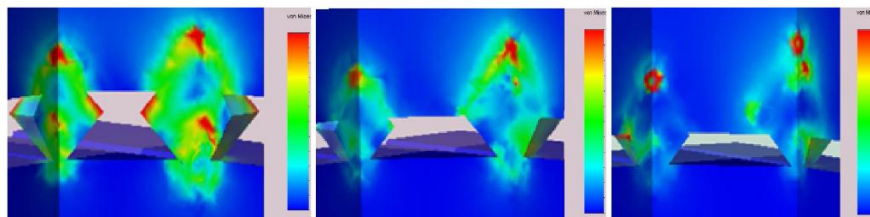
Как видно из таблицы глубина заделки варьировалась в пределах от 30 до 70 мкм.

На рис. 7 представлены некоторые результаты расчетов в пакете CosmosWorks, что дает возможность наглядно рассмотреть распределение

полей напряжения в зоне НДС алмазно абразивной обработки в зависимости от изменения глубины заделки зерен.

Как видно из данных таблиц 1 и 2, особенностью планирования экспериментов является то, что в качестве факторов использовались не только технологические, но и физические параметры.

**Выводы и перспективы развития.** 1. Исследования по влиянию концентрации алмазных зерен в алмазоносном слое круга на 3D НДС в системе «ОМ – зерно – металлофаза – связка» позволили установить, что с уменьшение концентрации зерен, эквивалентные напряжения растут. Это позволяет физически обосновать установленную ранее эффективность использования кругов с пониженной концентрацией и особенно для шлифования СТП. 2. Установлен факт роста величины эквивалентных напряжений по мере уменьшения глубины заделки алмазных зерен в связке.



h=30 мкм ( $\sigma_{\text{экв}}=2,69$  ГПа)      h=50 мкм ( $\sigma_{\text{экв}}=1,87$  ГПа)      h=70 мкм ( $\sigma_{\text{экв}}=1,52$  ГПа)

Рисунок 7 – Влияние глубины заделки алмазных зерен на 3D НДС зоны шлифования

Таблица 2 – Уровни факторов плана В4

Уровни факторов	Факторы							
	КТР металлофазы		Модуль упругости связки		Глубина заделки		Температура	
	Натуральное значение, 1/К	Кодированное значение $X_1$	Натуральное значение, Н/м <sup>2</sup>	Кодированное значение $X_2$	Натуральное значение, мкм	Кодированное значение $X_3$	Натуральное значение, К	Кодированное значение $X_4$
Верхний	$2,4 \cdot 10^{-5}$	+1	$1,9 \cdot 10^{11}$	+1	30	+1	800	+1
Основной	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0	$1,3 \cdot 10^{11}$	0	50	0	600	0
Нижний	$1,2 \cdot 10^{-5}$	-1	$0,7 \cdot 10^{11}$	-1	70	-1	400	-1

Уравнение регрессии в кодированной форме имеет вид:

$$Y = 3,023 - 0,142X_1 - 0,337X_2 - 2,087X_3 + 0,413X_4 - 0,168X_1X_2 + 0,329X_1X_3 + 0,348X_1X_4 + 0,33X_2X_3 + 0,374X_2X_4 - 0,14X_3X_4 + 1,225X_1^2 - 1,31X_2^2 + 0,145X_3^2 + 2,123X_4^2$$

При определенном уровне заделки это может привести к вырыву зерна из связки. Это объясняет тот факт, что глубина заделки зерен связке является важнейшими фактором процесса алмазного шлифования. Управляя ею можно регулировать степень обновления режущего рельефа алмазного круга, а, значит, и значения выходных показателей процесса шлифования в целом. Полученные уравнения регрессии могут быть использованы для практических расчета при назначении оптимальных условий обработки.

В дальнейшем представляет определенный интерес вопрос оптимизации процесса шлифования.

**Список литературы:** [7]. *Грабченко А. И.* Оптимизация результатов 3D моделирования процесса спекания алмазно-абразивных инструментов / *А. И. Грабченко, В. А. Федорович, И. Н. Пыжов* // Информационні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць. - Вип. 2(7). - О.: Наука і техніка, 2014. - С. 16-24. [8]. *Грабченко А. И.* 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования : учеб. пособие / *А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович*. - Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. - 364 с. [9]. *Криворучко Д. В.* Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы : монография / *Д. В. Криворучко, В. А. Залогова*. Под общей редакцией *В. А. Залогова* - Сумы: Университетская книга, 2012. - 450с. [10]. Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні: підручник для студентів вищих навчальних закладів / *Грабченко А.І., Вереzub М.В., Внуков Ю.М.* та ін.; за редакцією А.І. Грабченка. - Житомир, ЖДТУ, 2003 р. - 451 с. [11]. *Грабченко А.И.* Роль концентрации алмазов в круге при шлифовании поликристаллов сверхтвердых материалов / *Грабченко А.И., Федорович В.А., Образцов Б.В* // Сверхтвердые материалы.-1984.-Вып.1.-С. 49-52. [6]. *Грабченко А.И.* Роль характеристики алмазного круга в комбинированных процессах алмазного шлифования ПСТМ / *А. И. Грабченко, И. Н. Пыжов, Д. М. Алексеев* / Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки», №3, т.1.-2010.- С 38-48. Пат. 69459 Україна, МПК (2011.01) B24В 1/00. [7]. Матеріал абразивного круга / *Грабченко А.І., Пижов І.М., Федорович В.О.* Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2011 13226; заявл. 09.11.2011; опубл. 25.04.2012. Бюл. № 8. Пат. 67850 Україна, МПК (2011.01) B24В 1/00. [8]. Спосіб визначення оптимальної концентрації алмазних кругів на металевих зв'язках/ *Алексеев Д.М., Грабченко А.І., Пижов І.М., Федорович В.О.* Власник Сумський державний університет. - № у 2011 08966; заявл. 18.07.2011; опубл. 12.03.2012. Бюл. № 5. [9]. *Сизый Ю. А.* Основы научных исследований в технологии машиностроения. Учебн. Пособие / *Ю. А., Сизый, Д. В. Сталинский*. - Харьков: УкрГНТЦ «Енергосталь», «Издательство САГА». - 2007. - 212 с.

**Bibliography (transliterated):** [1] *Grabchenko A. I.* Optimizacija rezul'tatov 3D modelirovaniya processa spekanijaalmazno-abrazivnyh instrumentov / *A. I. Grabchenko, V. A. Fedorovich, I.N. Pyzhov* // Informacijni tehnologii v osviti, nauči ta virobničtvi: zbirnik naukovih prac'. - Vip. 2(7). - O.: Nauka i tehnika, 2014. - S. 16-24. [2] *Grabchenko A. I.* 3D modelirovaniealmazno-abrazivnyh instrumentov i processov shlifovanija : ucheb. posobie / *A.I. Grabchenko, V.L. Dobroskok, V.A. Fedorovich*. - Har'kov: NTU «HPI», 2006. - 364 s. [3] *Krivoruchko D. V.* Modelirovanie processov rezanija metodom konechnyh jelementov: metodologicheskie osnovy : monografija / *D.V. Krivoruchko, V.A. Zaloga*. Pod obshhej redakciej *V.A. Zalogi* - Sumy: Universitetskaja kniga, 2012. - 450 s. [4] *Robochi procesi visokih tehnologij u mashinobuduvanni: pidruchnik dlja studentiv vishnih navchal'nih zakladiv / Grabchenko A.I., Verezub M.V., Vnukov Ju.M. ta in.; za redakcieju A.I. Grabchenka*. - Zhitomir, ZhDTU, 2003 r. - 451 s. [5] *Grabchenko A.I.* Rol' koncentraciialmazov v krugu pri shlifovanii



polikristallov sverhtverdyh materialov / *Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Obrazkov B.V.* // Sverhtverdye materialy. – 1984. – Vyp. 1. – S.49-52. [6] *Grabchenko A.I.* Rol' harakteristiki almaznogo kruga v kombinirovannyh processah almaznogo shlifovanija PSTM / *A.I. Grabchenko, I.N. Pyzhov, D.M. Alekseenko* / Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu. Serija «Tehnichni nauki», No 3, t.1. – 2010. – S. 38-48. Pat. 69459 Ukraïna, MPK (2011.01) V24V 1/00. [7] Material abrazivnogo kruga / *Grabchenko A.I., Pizhov I.M., Fedorovich V.O.* Vlasnik Nacional'nij tehnicnij universitet «Harkivs'kij politehnicnij institut». – No u 2011 13226; zajavl. 09.11.2011; opubl. 25.04.2012. Bjul. № 8. Pat. 67850 Ukraïna, MPK (2011.01) V24V 1/00. [8] Sposib viznachennja optimal'noï koncentracii almaznih krugiv na metalevih zv'jazkah/ *Alekseenko D.M., Grabchenko A.I., Pizhov I.M., Fedorovich V.O.* Vlasnik Sums'kij derzhavnij universitet. -№ u 2011 08966; zajavl. 18.07.2011; opubl. 12.03.2012. Bjul. № 5. [9] *Sizyj Ju.A.* Osnovy nauchnyh issledovanij v tehnologii mashinostroenija. Uchebn. posobie / *Ju.A. Sizyj, D.V. Stalinskij.* – Xar'kov: UkrGNTC «Energostal'», «Izdatel'stvo SAGA». – 2007. – 212 s.